

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

①2 **Offenlegungsschrift**
①0 **DE 195 18 804 A 1**

⑤1 Int. Cl. 6:
B 29 C 45/76

②1 Aktenzeichen: 195 18 804.7
②2 Anmeldetag: 26. 5. 95
④3 Offenlegungstag: 21. 12. 95

DE 195 18 804 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1
27.05.94 DE 44 18 532.4 03.05.95 DE 195157370

⑦1 Anmelder:
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

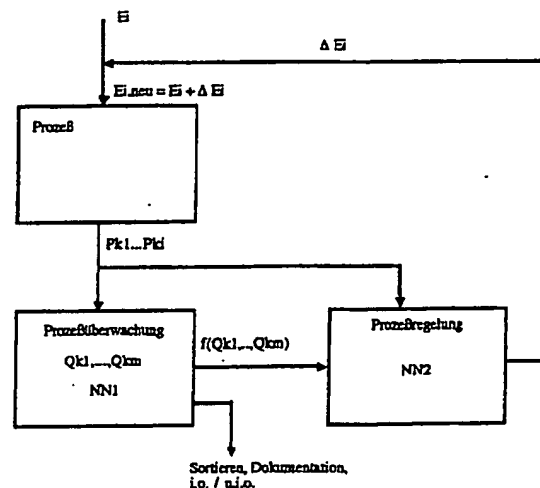
⑦4 Vertreter:
Dreiss und Kollegen, 70188 Stuttgart

⑦2 Erfinder:
Schmidberger, Ernst, Dipl.-Ing., 70569 Stuttgart, DE;
Müssigmann, Uwe, Dr.-Ing., 71067 Sindelfingen, DE;
Abele, Andreas, Dipl.-Phys., 74385 Pleidelsheim, DE;
Schmutz, Manfred, Dr.rer.nat., 71067 Sindelfingen,
DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Überwachung eines Produktionsprozesses

⑤7 Verfahren zur Überwachung eines Produktionsprozesses, bei dem
(a) aus Signalverläufen an mehreren Stellen des Prozesses während eines für die Erzeugung eines Produktes maßgeblichen Prozeßabschnittes Prozeßkennzahlen (Pk1...Pkn) ermittelt werden;
(b) die bei der Erzeugung von Produkten auftretende Prozeßkennzahlen einem neuronalen Netzwerk (NN1) als dessen Eingangsgrößen zugeordnet werden;
(c) dem neuronalen Netzwerk (NN1) in einer Bewertungsphase Werte von Qualitätsmerkmalen (Qk1...Qkm) zugeordnet werden;
(d) das neuronale Netzwerk (NN1) derart trainiert wird;
(e) in einer Überwachungsphase aus den Prozeßkennzahlen mit Hilfe des trainierten neuronalen Netzwerkes (NN1) Qualitätsmerkmalswerte oder -klassen abgeleitet werden, die angezeigt und/oder dokumentiert und/oder zum Sortieren der erzeugten Produkte (i.o. oder n.i.o.) und/oder zur Regelung des Prozesses eingesetzt werden.



DE 195 18 804 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Überwachung eines Produktionsprozesses, bei dem eine Messung von Signalverläufen an mehreren Stellen des Prozesses durch Sensoren und eine Bewertung der erzeugten Produkte stattfindet.

Eine Produktionsüberwachung mit Hilfe der statistischen Prozeßregelung (SPC) basiert heute im wesentlichen auf stichprobenförmiger Produktprüfung fertiger Produkte. Die Nachprüfung der Produkte, sei es ständig, sei es nur als Stichproben, ist jedoch sehr aufwendig. Eine Regelung eines Prozesses durch Änderung der Einstellwerte ist wegen der komplexen Zusammenhänge häufig sehr schwierig und erfolgt deshalb häufig ohne fest zuordenbare Regeln, so daß sie sich nicht für eine Automatisierung eignet.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren der genannten Art zu schaffen, das eine Überwachung und die zugehörige Dokumentation ohne Überprüfung der Produkte selbst ermöglicht.

Aus der DE 42 09 746 A1 ist ein Verfahren zur Optimierung eines technischen Neuro-Fuzzy-System bekannt geworden, bei dem die Daten, mit denen der Neuro-Fuzzy-Regler trainiert wird, durch Simulation erzeugt werden müssen. Diese Simulation ist aber ein aufwendiger Vorgang und setzt auch eine Kenntnis des Kausalzusammenhangs zwischen Prozeßablauf und den zum Training des Neuro-Fuzzy-Reglers erforderlichen Daten voraus.

Aus der DE 44 16 317 A1 ist ein Verfahren und eine Regeleinrichtung zur Regelung eines materialverarbeitenden Prozesses bekannt geworden, bei dem unter Berücksichtigung prozeßrelevanter Materialeigenschaften gewisse Prozeßparameter vorausberechnet werden, die zur Voreinstellung des Systems dienen. Auch diese Berechnung setzt die Kenntnis kausaler Zusammenhänge zwischen den Einflußgrößen auf den Prozeß und den Prozeßparametern voraus. Dies ist aber bei vielen Prozessen nicht möglich. Dasselbe gilt auch für das Verfahren und die Regeleinrichtung nach der DE 44 16 364 A1.

Die Lösung der gestellten Aufgabe muß also die Schwierigkeit überwinden, daß der Kausalzusammenhang zwischen Einstellgrößen des Prozesses, den Prozeßparametern, den Qualitätsmerkmalen und/oder den Merkmalsklassen der erzeugten Produkte nicht bekannt ist und daß die für einen Prozeß charakteristischen Daten eine Datenfülle ergeben, die parallel zum Prozeßablauf nicht erfaßbar und verarbeitbar ist. Zur Erläuterung sei noch ergänzt. Ein Qualitätsmerkmal ist z. B. die Länge eines Produktes. Mindestens sind zwei Merkmalsklassen (i.o. oder n.i.o.) vorgesehen. Es können aber auch mehr sein, z. B. 10—11 mm, 11—12 mm, ..., 19—20 mm, usw.

Erfindungsgemäß wird die genannte Aufgabe dadurch gelöst, daß

- (a) aus den Signalverläufen während eines für die Erzeugung eines Produktes maßgeblichen Prozeßabschnittes Prozeßkennzahlen ($Pk1 \dots Pkn$) ermittelt werden, die derart bestimmt sind, daß Änderungen der Prozeßkennzahlen mit einer Änderung bestimmter Qualitätsmerkmale ($Qk1 \dots Qkm$) der Produkte korrelieren;
- (b) die bei der Erzeugung von Produkten auftretenden Prozeßkennzahlen einem neuronalen Netzwerk (NN1) als dessen Eingangsgrößen zugeordnet werden;

(c) dem neuronalen Netzwerk (NN1) in einer Bewertungsphase als den Prozeßkennzahlen zugeordnete Ausgangsgrößen Werte von Qualitätsmerkmalen ($Qk1 \dots Qkm$) zugeordnet werden, die bei der Erzeugung der Produkte festgestellt werden;

(d) in einer Trainingsphase das neuronale Netzwerk (NN1) derart trainiert wird, daß es mit hoher Sicherheit jedem bei einem Prozeßabschnitt erzeugten Satz von Prozeßkennzahlen Qualitätsmerkmalsklassen ($Qk1 \dots Qkm$) zuordnet, die gleich denen des in dem Prozeßabschnitt erzeugten Produktes sind, und

(e) in einer Überwachungsphase aus den Prozeßkennzahlen mit Hilfe des trainierten neuronalen Netzwerkes (NN1) Qualitätsmerkmalswerte oder -klassen abgeleitet werden, die angezeigt und/oder dokumentiert und/oder zum Sortieren der erzeugten Produkte (i.o. oder n.i.o.) und/oder zur Regelung des Prozesses eingesetzt werden.

Eine Besonderheit des erfindungsgemäßen Verfahrens liegt darin, daß neuronale Netze verwendet werden, die anhand tatsächlich ablaufender Prozeßvorgänge und der dabei interaktiv ermittelten Werte von Qualitätsmerkmalen trainiert werden, so daß anschließend — nach der Trainingsphase — mit Hilfe dieser Verfahren ohne Prüfung der erzeugten Produkte der Prozeß so überwacht und/oder geregelt werden kann, daß eine Aussage darüber, ob die Produkte in Ordnung (i.o.) oder nicht in Ordnung (n.i.o.) sind, möglich wird. Die Eingangsparameter dieses neuronalen Netzes sind Prozeßkennzahlen, die aus Signalverläufen, die von Sensoren bei dem Prozeß gemessen werden, derart ermittelt werden, daß ihre Signifikanz für die Qualität der Produkte bei gleichzeitiger Datenreduktion erhalten bleibt.

Dieselbe Idee kann dann noch dahingehend verbessert werden, daß

(f) die Prozeßkennzahlen ($Pk1 \dots Pkn$) ferner einem zweiten neuronalen Netzwerk (NN2) als Eingangsgrößen zugeführt werden;

(g) in einer Bewertungsphase einer Veränderung der Prozeßkennzahlen bestimmte Änderungswerte (ΔEi) für die Einstellgrößen (Ei) des Prozesses zugeordnet werden, die eine Rückführung der Prozeßkennzahlen an die Ausgangswerte bewirken;

(h) daß das zweite neuronale Netzwerk (NN2) in einer Trainingsphase trainiert wird; und daß

(i) eine Aktivierungslogik eine Abweichung der Qualitätswerte ($Qk1 \dots Qkm$) von einem gewünschten Satz von Qualitätswerten feststellt und bei einer solchen Feststellung mittels der vom zweiten neuronalen Netzwerk (NN2) ermittelten Änderungswerte (ΔEi) der Einstellgrößen neue Einstellgrößen (Ei , neu) des Prozesses festlegt.

Bei dieser Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt also eine Regelung des Prozesses, so daß sowohl Überwachung als auch Regelung vollautomatisch ablaufen und nur wenige Produkte, die nicht in Ordnung (n.i.o.) sind, erzeugt werden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung des Verfahrens;

Fig. 2 die Zusammenhänge der Qualität der erzeugten Produkte mit den verschiedenen Einflußgrößen;

Fig. 3 verschiedene von Sensoren gemessene Signal-

verläufe;

Fig. 4 verschiedene Werkzeuginnendruckverläufe für i.o.-Teile;

Fig. 5 verschiedene Werkzeuginnendruckverläufe für n.i.o.-Teile;

Fig. 6 das neuronale Netzwerk NN1 zur Überwachung des Prozesses;

Fig. 7 eine weitere Darstellung des Verfahrens;

Fig. 8 die verschiedenen Abläufe für Bewertungsphase, Trainingsphase, Überwachungsphase und Regelungsphase;

Fig. 9 eine Darstellung zur Generalisierungsfähigkeit der neuronalen Netzwerke;

Fig. 10 das neuronale Netzwerk NN2 zur Regelung des Prozesses;

Fig. 11 die Abhängigkeit der Gesamtqualität von zwei Prozeßparametern zur Erläuterung einer evolutionärsbasierten Optimierungsstrategie.

Fig. 1 zeigt den Ablauf der Überwachung und Regelung eines Prozesses, der durch das Rechteck "Prozeß" dargestellt ist. Als Beispiel wird im folgenden das Spritzgießen von Kunststoff betrachtet. Von dem Ablauf dieses Prozesses soll sich eine Qualitätsüberwachung ableiten lassen, die im Rechteck "Qualitätsüberwachung" angezeigt ist, und zwar ohne Untersuchung bzw. Kontrolle des Produktes selbst. Aus dem Ablauf eines Prozesses selbst, der ja kausal dafür ist, ob ein Produkt "in Ordnung" (= i.o.) oder "nicht in Ordnung" (= n.i.o.) ist, soll abgeleitet werden, ob das hergestellte Erzeugnis i.o. oder n.i.o. ist. Ferner soll auch eine Prozeßregelung einsetzen, die bei einer nicht erlaubten Abweichung des Prozesses von einem bestimmten Soll-Arbeitspunkt die Rückführung auf diesen durch Ableitung von Änderungsgrößen ΔE_i ($i = 1, 2, \dots$) ermöglicht, durch die die Einstellgrößen des Prozesses so korrigiert werden können, daß neue Einstellgrößen $E_{i,neu} = E_i + \Delta E_i$ erzeugt werden, die den Prozeß wieder auf den optimalen Arbeitspunkt einstellen.

Da der Kausalzusammenhang zwischen den einzelnen meßbaren Prozeßgrößen — nicht zu verwechseln mit den Einstellgrößen E_i an der Maschine oder den Maschinen — und dem Prozeßergebnis, also der Qualität der erzeugten Produkte, so komplex ist, daß eine geschlossene Darstellung — etwa in Form eines Algorithmus — nicht möglich ist, muß ohne diese Kenntnis ein Modell dieses Zusammenhangs entwickelt werden, das eine Überwachung der Qualität des erzeugten Produktes und eine daran ausgerichtete Regelung des Prozesses ermöglicht.

Beim Spritzgießen von Kunststoffen hängt die Qualität des Produktes nicht nur von der einstellbaren und eingestellten Funktion der Maschine und des Werkzeugs, die durch Einzelgrößen E_i steuerbar ist, ab, sondern auch von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, usw.) und dem Material ab. Dies ist schematisch in Fig. 2 dargestellt. Die Eigenschaften des Materials können nicht nur bei industriell nach bestimmten Spezifikationen hergestellten Vorprodukten von Charge zu Charge schwanken; sie sind, etwa bei der zunehmenden Verarbeitung von Recyclat, oft auch kurzfristig sehr unterschiedlich, und zwar ohne daß ein schlüssiger Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und der Qualität der erzeugten Produkte darstellbar ist, ja sogar ohne daß die Veränderungen der Materialeigenschaften auch nur bekannt sind.

In einem ersten Schritt sieht das erfindungsgemäße Verfahren die Ableitung von Prozeßkenngrößen P_{ki} vor, die den Prozeßablauf selbst charakterisieren, die

also zwar einerseits von den in Fig. 2 dargestellten Einflußgrößen abhängig sind, die sich aber auch bei gleichbleibenden Einstellwerten verändern können.

Fig. 3 zeigt für das Beispiel des Kunststoff-Spritzgießens einige wesentliche Signalverläufe einiger wesentlicher Prozeßgrößen, die während des zu überwachenden Prozesses an einer Spritzgußmaschine auftreten, so den Hydraulikdruck p_{Masch} , den Schneckenweg s_{Schn} , einen bestimmten Verteilerdruck p_V und ein Druckverlauf p_F in einem Formnest. Selbstverständlich kann man solche Größen an mehreren Stellen messen, also etwa Werkzeuginnendrucke p_F an mehreren Stellen, z. B. angußnah und angußfern. Diese Signalverläufe kennzeichnen den realen Ablauf eines Prozeßabschnitts, während ein Produkt, also etwa ein Spritzgußteil, gefertigt wird. Sie werden durch geeignete Sensoren ermittelt. Die Sensorik kann natürlich prozeßabhängig erweitert, z. B. um Düsendruck, Düsentemperatur zu messen, oder reduziert werden.

In den Fig. 4 und 5 sind nun, wiederum als Beispiel, zwei angußnahe Werkzeuginnendruckverläufe für i.o.-Produkte (Fig. 4) und für n.i.o.-Produkte (Fig. 5) dargestellt. Jeweils im rechten oberen Quadranten findet sich dieselbe Darstellung, jedoch nur für die Anfangsphase von wenigen Sekunden, also zeitlich gestreckt. Aus einem Vergleich der selben Werkzeuginnendruckverläufe p_{F1} (i.o.), p_{F2} (i.o.) in Fig. 4 und p_{F1} (n.i.o.), p_{F2} (n.i.o.) in Fig. 5 läßt sich deutlich erkennen, daß typische Charakteristika dieser Druckverläufe mit der Qualität der Teile (i.o. oder n.i.o.) korrelierbar sind. So erkennt man, daß bei den i.o.-Teilen das Maximum der Druckverläufe nach ca. 2,5 bis 3,5 Sekunden erreicht wird, während es bei den n.i.o.-Teilen bei 2,5 bis 5,0 Sekunden auftritt. Man erkennt auch aus den zeitlich gestreckten Abbildungen im rechten oberen Quadranten der beiden Abbildungen, daß der Druckanstieg (Gradient) bei den n.i.o.-Teilen sehr viel stärker in der Steilheit schwankt.

Unter Beachtung derartiger Erkenntnisse, die aber in den Fig. 3 und 4 nur beispielhaft zu verstehen sind und die für jeden Prozeß und jede Prozeßkenngröße unterschiedlich sind und daher prozeßspezifisch analysiert werden müssen, kann man aus den Signalverläufen Prozeßkenngrößen P_{ki} ableiten, und diese mit der Qualität der erzeugten Produkte, also im einfachsten Fall mit der Feststellung i.o. oder n.i.o. korrelieren.

Die Ableitung von Prozeßkenngrößen anstelle einer direkten Verarbeitung der Signalverläufe dient dazu, pro Prozeßabschnitt und Meßstelle pro Signalverlauf mit sehr viel weniger Daten und sehr viel weniger Prozessor- und Speicherkapazität auszukommen, als dies ansonsten erforderlich wäre. Eine solche Ableitung von Prozeßkenngrößen P_{ki} erlaubt es, die anfallenden Daten so zu reduzieren, daß die anschließende Verarbeitung zur Überwachung und Regelung überhaupt handhabbar wird. Ansonsten würden die Signalverläufe in digitalisierter Form je nach Abtastfrequenz und sonstigen Charakteristika zu einer zu hohen Zahl von zu verarbeitenden Daten führen.

Zur Datenreduktion müssen signifikante Größen der Signalverläufe ermittelt und dargestellt werden, z. B. die Amplitude des Maximums, der Zeitpunkt des Auftretens des Maximums, die Steilheit des Signalverlaufes an bestimmten Stellen, Integrale von Signalsegmenten, usw.

Die Ableitung von Prozeßkenngrößen ist in der zusammenfassenden Darstellung nach Fig. 8 in den Zeilen 1, 2, 5 und 6 jeweils im zweiten Block von links als "Prozeßkenngrößen-Berechnung" dargestellt. Beispielsweise kann man für die Überwachung eines Spritzguß-

prozesses 20 Prozeßkenngrößen vorsehen ($i = 20$).

Ein Merkmal der Erfindung besteht darin, zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen Prozeßkenngrößen $Pk1 \dots Pki$ und der Qualität der erzeugten Teile, die durch Qualitätsmerkmale Qm und der Merkmalsklassen $Qk1 \dots Qkm$ zu kennzeichnen ist, ein neuronales Netzwerk NN1 einzusetzen. Ein solches neurales Netzwerk NN1 ist in Fig. 6 beispielhaft dargestellt. Im einfachsten Fall ($m = 2$) bedeutet $Qk1 = 1.0$ und $Qk2 = n.i.o$ für das überwachte Merkmal. Ein Beispiel für $m = 3$ ist z. B., daß ein bestimmtes Maß des Produktes etwa zu lang ($Q1$), zu kurz ($Q2$) oder zufriedenstellend ($Q3$) ist. Durch Verwendung mehrerer solcher neuronaler Netzwerke kann das neuronale Netzwerk NN1 modular für eine beliebige Anzahl von Qualitätsmerkmalen erweitert werden.

Die Theorie neuronaler Netzwerke ist an sich bekannt. Ein solches neuronales Netzwerk besteht ggf. aus mehreren Schichten, im Beispiel nach Fig. 6 aus drei Schichten, über die eine gewichtete Verknüpfung der Prozeßkenngrößen $Pk1 \dots Pki$ mit Qualitätsmerkmalsklassen $Qk1 \dots Qkm$, wie sie für die Qualitätsmerkmale und somit die Qualität eines erzeugten Produktes charakteristisch sind, hergestellt wird.

In einer ersten "Bewertungs"-Phase (vgl. die 1. Zeile in Fig. 8) werden den aus den Signalverläufen abgeleiteten Prozeßkenngrößen Pki interaktiv bestimmte Qualitätsmerkmale Qkj ($Qk1 \dots Qkm$) zugeordnet, die durch visuelle Begutachtung und/oder Vermessung der erzeugten Produkte festgestellt werden. Im Beispiel des Spritzgießens kann das z. B. bedeuten, daß bei einem Produkt etwa die Dicke, die Oberflächengüte an verschiedenen Stellen, geometrische Abmessungen und ihre Abweichungen von einem Sollmaß, die Festigkeit, usw. festgestellt werden, die man Qualitätskenngrößen Qkj zuordnet. Diese Zuordnung wird nun entweder in einem "Trainingsdatenfile" erfaßt und dient dann in einem späteren — separaten — Vorgang zum "Training" des neuronalen Netzwerkes.

Das Training eines neuronalen Netzwerkes findet anhand des Trainingsdatenfiles oder eines Teildatensatzes davon unter Anwendung eines der allgemeinen bekannten Lernalgorithmen wie z. B. dem "Back Propagation"-Algorithmus statt. Fig. 6 zeigt die Änderung der Gewichte im neuronalen Netzwerk NN1 auf Grund eines Fehlersignals, das Abweichungen in der Lernphase darstellt.

Durch ein "Training", das etwa — im Beispiel des Spritzgießens — anhand von 60 Prozeßabschnitten (d. h. der Erzeugung von 60 Produkten) ablaufen kann, läßt sich bewirken, daß ein neuronales Netzwerk eine Klassifikationssicherheit, d. h. korrekte Zuordnung von Prozeßkenngrößen und Qualitätsmerkmalen, in der Größenordnung von mehr als 95% erreicht.

Auf diese Weise ist es also möglich, durch

- die Ableitung von Prozeßkenngrößen aus den Signalverläufen während eines aktuellen Prozeßabschnitts und

- Training des neuronalen Netzwerkes NN1 anhand einer Zuordnung von Qualitätskenngrößen im neuronalen Netzwerk NN1 ein Prozeßmodell zu erstellen, das den kausalen Zusammenhang zwischen den Prozeßkenngrößen Pki und den Qualitätskenngrößen Qkj nachbildet und nach Abschluß der Bewertungsphase (Fig. 8, Zeile 1) und der Trainingsphase (Fig. 8, Zeile 3) anhand der jeweiligen Prozeßkenngrößen eine Aussage erlaubt, ob

die Qualität eines Produktes einem bestimmten Satz von Qualitätsklassen entspricht (= i.o.) oder nicht (= n.i.o.), und zwar ohne Prüfung des Produktes.

Für jedes zur Ermittlung der Qualität herangezogene Qualitätsmerkmal (also etwa: Aussehen der Oberfläche, Füllung der Form, Abmessungen, usw.) kann man auch jeweils ein getrenntes neuronales Netzwerk verwenden, um einen modularen Aufbau und hierarchische Modellstrukturen möglich zu machen.

In der Trainingsphase kann also z. B. durch hierarchische Anordnung von Netzen zuerst die Überwachung attributiver Merkmale erzeugt werden und, wenn diese i.o. sind, eine quantitative Merkmalsüberwachung ausgelöst werden. In der Trainingsphase des neuronalen Netzwerkes erfolgt somit die attributive Zuordnung bestimmter Prozeßkenngrößen zu einem bestimmten Prozeßvorgang oder -abschnitt.

Vor dem Training des neuronalen Netzwerkes kann in einer Datenbank eine Zuordnung der Prozeßkenngrößen zu den Qualitätskenngrößen eines Produktes erfolgen, also die Erzeugung eines Trainingsvektors. Mehrere Trainingsvektoren ergeben einen Trainingssatz. Die Trainingssätze werden in der Trainingsdatenfile gespeichert.

In Fig. 7 ist noch einmal das gesamte System im Zusammenhang dargestellt. Von den Sensoren in der Maschine werden die Sensorsignale (= Prozeßdaten) abgeleitet. Diese lösen dann die entsprechenden Signalverläufe aus, die an die zentrale Datenverarbeitungseinheit gelangen und dort in der beschriebenen Weise weiterverarbeitet werden.

In Fig. 8 ist der Vorgang der interaktiven Bewertung in der ersten Zeile dargestellt. Dabei werden die Prozeßkenngrößen abgeleitet und dann dem Qualitätsmerkmal zugeordnet. In der dritten Zeile der Fig. 8 ist der Trainingsablauf mit Hilfe des ersten neuronalen Netzwerkes NN1 dargestellt.

In der 5. Zeile der Fig. 8 ist dann die Überwachungsphase dargestellt, in der — nach Abschluß der Trainingsphase — direkt aus den Signalverläufen eine Sortierung in i.o.-Teile und n.i.o.-Teile bei gleichzeitiger Anzeige und Dokumentation vorgenommen wird.

Das neuronale Netzwerk NN1 sollte so trainiert sein — vgl. Fig. 9 — daß es anhand gemessener Prozeßkennzahlensätze, symbolisiert durch die Punkte $P1, P2, \dots P8$, einen Raum definiert, in dem die Qualitätsmerkmale sowohl für i.o.- als auch für n.i.o.-Klassen erfüllt sind, und zwar auch für Punkte Px , die nicht während der Trainingsphase erfaßt wurden. Man spricht hier von einer Generalisierungs- oder Interpolationsfähigkeit des neuronalen Netzwerkes.

Das Netz soll nicht nur erkennen können, ob ein bestimmter eintrainierter Satz von Prozeßkenngrößen zu einem bestimmten Ergebnis (i.o. oder n.i.o.) führt. Es sollte auch einen Satz Prozeßkenngrößen als solchen erkennen, zu dem es noch nicht trainiert worden ist und der außerhalb eines definierten i.o./n.i.o.-Bereiches, wie z. B. des Quaders $P1 \dots P8$, liegt. Ein einfaches Beispiel soll dies verdeutlichen: Wenn man ein neuronales Netz darauf trainiert, eine Katze von einem Hund zu unterscheiden und zeigt ihm dann eine Giraffe, so soll es nicht versuchen, zu entscheiden, ob die Giraffe ein Hund oder eine Katze ist, sondern es soll erkennen, daß es die Giraffe nicht kennt. Dieses erreicht man z. B. mit Hilfe eines sog. "RBF" (= Radial Basis Function)-Netzwerkes. Etwas nicht Bekanntes oder nicht Realisierbares wird

als fehlerhaft angezeigt. Die Anzeige kann ggf. zu einem Nachtraining des neuronalen Netzwerkes führen.

Ein weiterer Abschnitt des Verfahrens kann, wie bereits erwähnt, darin bestehen, eine Regelung durchzuführen. Diese soll bei Abweichung der Qualitätskenngrößen Q_k von den gewünschten Werten die Einstellgrößen des Prozesses so verändern, daß die angestrebten Werte der Qualitätsmerkmale erneut erreicht werden.

Dies erfolgt mit Hilfe eines weiteren neuronalen Netzwerkes NN2, das in Fig. 10 dargestellt ist. Auch diesem Netzwerk werden die Prozeßkenngrößen $P_{k1} \dots P_{kn}$ eingegeben. Sie werden bestimmten Werten zur Veränderungen der Einstellwerte $\Delta E_{k1} \dots \Delta E_{kn}$ zugeordnet, zunächst im Wert willkürlich und dann wiederum während einer Trainingsphase derart, daß das Fehlersignal die interne Netzwerkgewichtung der einzelnen Einflußgrößen verändert. Am Schluß nach Ablauf der Trainingsphase enthält das neuronale Netzwerk ein Modell, das bei Abweichungen (PA') des Arbeitspunktes des Prozesses, definiert durch Prozeßkenngrößen P_{ki} , von einem gewünschten Soll-Arbeitspunkt PA Änderungen der Einstellwerte $\Delta E_{k1} \dots \Delta E_{kn}$ angibt, die eine Rückführung des Prozesses auf den Arbeitspunkt PA herbeiführen. Der Weg der Abweichung ist in Fig. 9 als Pfad 1, die Rückführung als Pfad 2 angegeben.

Auch dies erfolgt, dies sei nochmal betont, — nach der Trainingsphase — ohne jegliche konkrete Prüfung der erzeugten Produkte. Diese Regelungsphase (einschließlich der vorlaufenden Bewertung und des Trainings) ist in Fig. 8 in den Zeilen 2, 4 und 6 dargestellt. Die Beschreibung ist aufgrund der vorstehend gegebenen Erläuterungen selbsterklärend.

Zu Fig. 10 ist noch zu ergänzen, daß, bevor eine Änderung der Einstellwerte eingeleitet wird, eine Aktivierungslogik $f(Q_{k1} \dots Q_{km})$, die im zweiten neuronalen Netzwerk NN2 vorgesehen ist, vom ersten neuronalen Netzwerk NN1 her aktiviert werden muß; die von den Prozeßkennzahlen P_{ki} abgeleiteten Qualitätsmerkmale gelangen an die Aktivierungslogik vom neuronalen Netzwerk NN1. Die Aktivierungslogik kann z. B. — im einfacheren Fall — so ausgelegt sein, daß sie eine Veränderung der Einstellwerte einleitet, wenn ein Produkt n.i.o. ist.

Andererseits sollte man die Regelung nicht erst einsetzen, wenn ein Produkt n.i.o. ist. Man möchte die Regelung schon dazu benutzen, bei Veränderungen, die noch innerhalb eines i.o.-Bereiches liegen (also etwa in einem kleineren im Quader nach Fig. 9 eingeschlossenem Bereich um den Punkt PA) eine Rückführung des Prozesses auf einen optimalen Arbeitspunkt innerhalb des i.o.-Bereiches zu bewirken. Man kann also die Aktivierungslogik auch dann schon ansprechen lassen, wenn ein Auswandern des Arbeitspunktes PA an einen Punkt PA' erfolgt ist, der zwar selbst noch i.o. ist, aber nahe an einem n.i.o.-Bereich liegt.

Fig. 11 ist die Darstellung einer evolutionsbasierten Regelung. Mit dieser Komponente ist vorgesehen, daß, wenn die erfaßten Prozeßkenngrößen P_{ki} den erfaßten Bereich (den Quader in Fig. 9) verlassen, schrittweise die Einstellwerte geändert werden und dann die sich dabei ergebenden Prozeßparameter feststellt und geprüft werden, ob sich die Qualitätsmerkmale in Richtung einer Verbesserung oder einer Verschlechterung der Gesamtqualität bewegen oder nicht und sich so zu einem Punkt "Max" bewegen, an den die Gesamtqualität ein Maximum ist.

Der vom "Start" in Fig. 11 ausgehende Evolutionsver-

lauf kann dabei auch ergeben, daß eine Veränderung der Einstellparameter die Gesamtqualität nicht verbessert, sondern verschlechtert. Eine Evolutionsstrategie sieht dann vor, daß sich das System dann ausgehend von einem vorhergehenden Punkt eine neue Einstellung in eine andere Richtung versucht, in der wieder eine Verbesserung der Qualität an Hand der Prozeßkennzahlen feststellbar ist.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Überwachung eines Produktionsprozesses, bei dem eine Messung von Signalverläufen an mehreren Stellen des Prozesses durch Sensoren und eine Bewertung der erzeugten Produkte stattfindet, dadurch gekennzeichnet, daß

(a) aus den Signalverläufen während eines für die Erzeugung eines Produktes maßgeblichen Prozeßabschnittes Prozeßkennzahlen ($P_{k1} \dots P_{kn}$) ermittelt werden, die derart bestimmt sind, daß Änderungen der Prozeßkennzahlen mit einer Änderung bestimmter Qualitätsmerkmale ($Q_{k1} \dots Q_{km}$) der Produkte korrelieren;

(b) die bei der Erzeugung von Produkten auftretende Prozeßkennzahlen einem neuronalen Netzwerk (NN1) als dessen Eingangsgrößen zugeordnet werden;

(c) dem neuronalen Netzwerk (NN1) in einer Bewertungsphase als den Prozeßkennzahlen zugeordnete Ausgangsgrößen Werte von Qualitätsmerkmalen ($Q_{k1} \dots Q_{km}$) zugeordnet werden, die bei der Erzeugung der Produkte festgestellt werden;

(d) in einer Trainingsphase das neuronale Netzwerk (NN1) derart trainiert wird, daß es mit hoher Sicherheit jedem bei einem Prozeßabschnitt erzeugten Satz von Prozeßkennzahlen Qualitätsmerkmalsklassen ($Q_{k1} \dots Q_{km}$) zuordnet, die gleich denen des in dem Prozeßabschnitt erzeugten Produktes sind, und

(e) in einer Überwachungsphase aus den Prozeßkennzahlen mit Hilfe des trainierten neuronalen Netzwerkes (NN1) Qualitätsmerkmalewerte oder -klassen abgeleitet werden, die angezeigt und/oder dokumentiert und/oder zum Sortieren der erzeugten Produkte (i.o. oder n.i.o.) und/oder zur Regelung des Prozesses eingesetzt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß (f) die Prozeßkennzahlen ($P_{k1} \dots P_{kn}$) ferner einem zweiten neuronalen Netzwerk (NN2) als Eingangsgrößen zugeführt werden;

(g) in einer Bewertungsphase einer Veränderung der Prozeßkennzahlen bestimmte Änderungswerte (ΔE_i) für die Einstellgrößen (E_i) des Prozesses zugeordnet werden, die eine Rückführung der Prozeßkennzahlen an die Ausgangswerte bewirken;

(h) daß das zweite neuronale Netzwerk (NN2) in einer Trainingsphase trainiert wird; und daß (i) eine Aktivierungslogik eine Abweichung der Qualitätswerte ($Q_{k1} \dots Q_{km}$) von einem gewünschten Satz von Qualitätswerten feststellt und bei einer solchen Feststellung mittels der vom zweiten neuronalen Netzwerk (NN2) ermittelten Änderungswerte (ΔE_i) der Einstellgrößen neue Einstellgrößen (E_i , neu) des

Prozesses festlegt

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur Durchführung einer evolutionsbasierten Optimierung der Regelung

(j) die Prozeßkennzahlen (P_{ki}) derart verändert werden, daß sie einen trainierten Bereich ($P_1 \dots P_8$) verlassen, 5

(k) die Einstellwerte (E_i) geändert und die sich dabei ergebende Prozeßkennzahlen festgestellt werden, 10

(l) eine Prüfung erfolgt, ob sich die Werte der Qualitätsmerkmale (Q_{km}) in Richtung einer Verbesserung der Gesamtqualität bewegt, und, falls dies zutrifft, der Prozeß mit den neuen Prozeßkennzahlen als Arbeitspunkt (PA) 15 fortgesetzt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß

(m) falls die nach Schritt (1) erfolgende Prüfung eine Verschlechterung der Gesamtqualität ergibt, das System auf einen vorhergehenden Arbeitspunkt zurückgeht und die weiteren Veränderungen in einer anderen Richtung sucht. 25

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

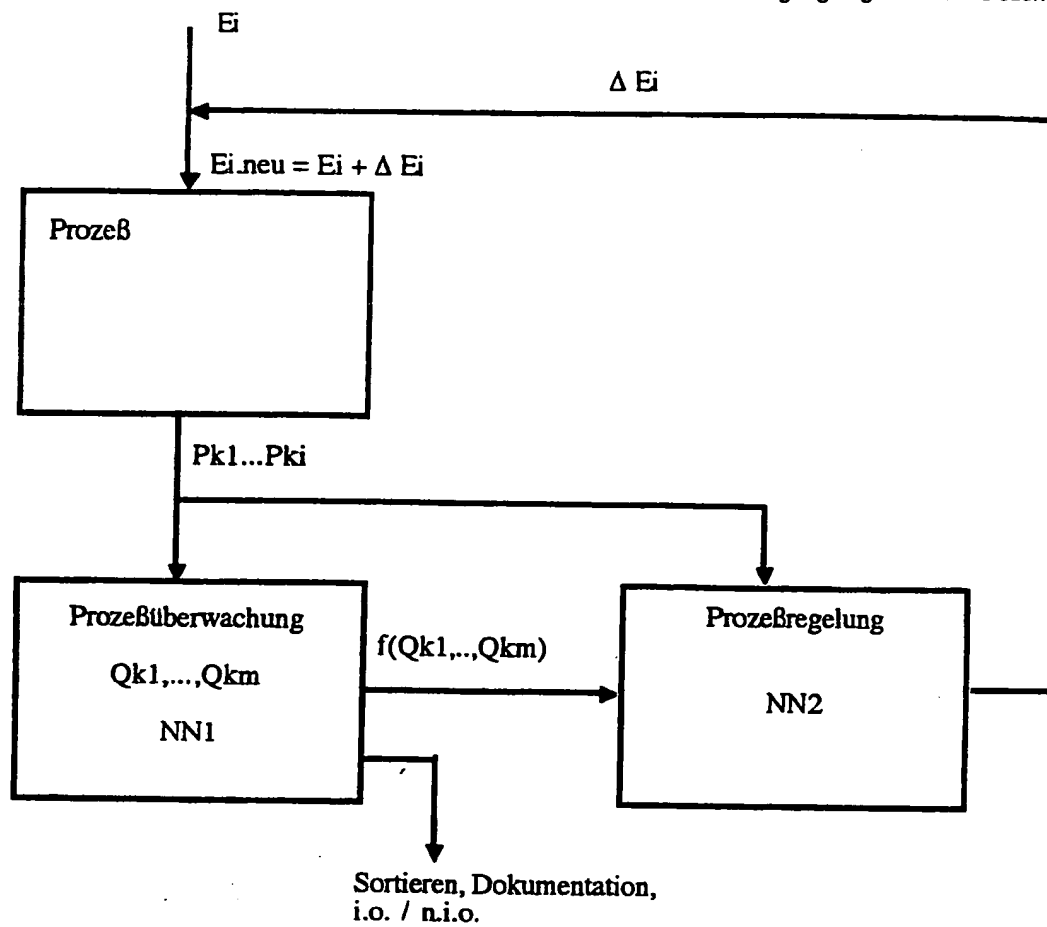


Fig. 1

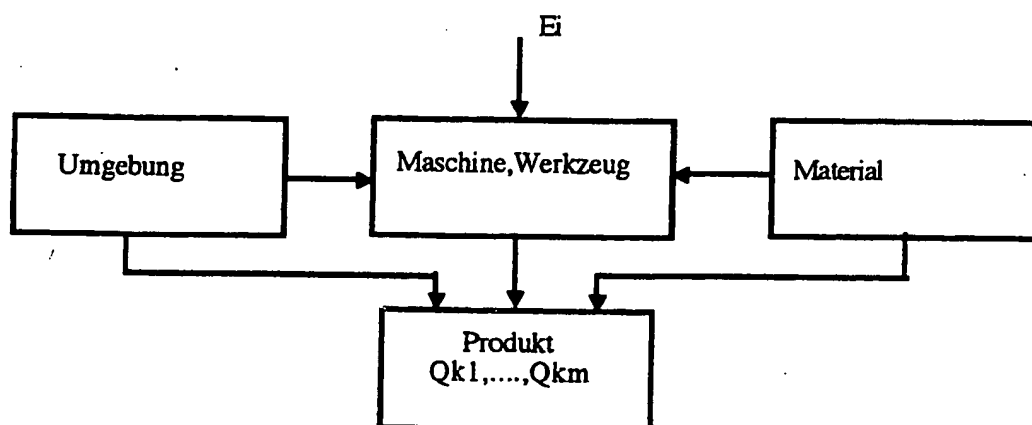


Fig. 2

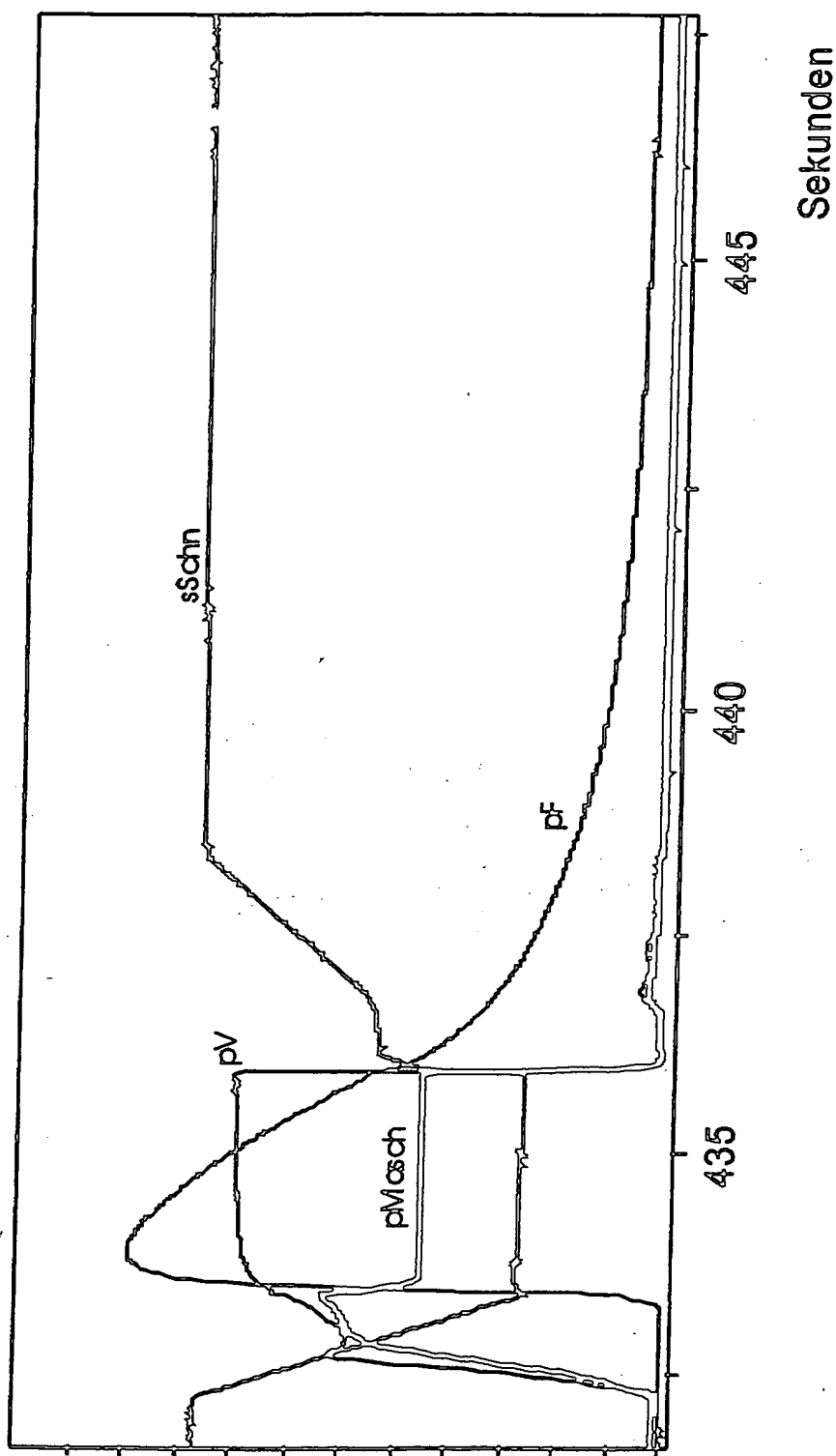


Fig. 3

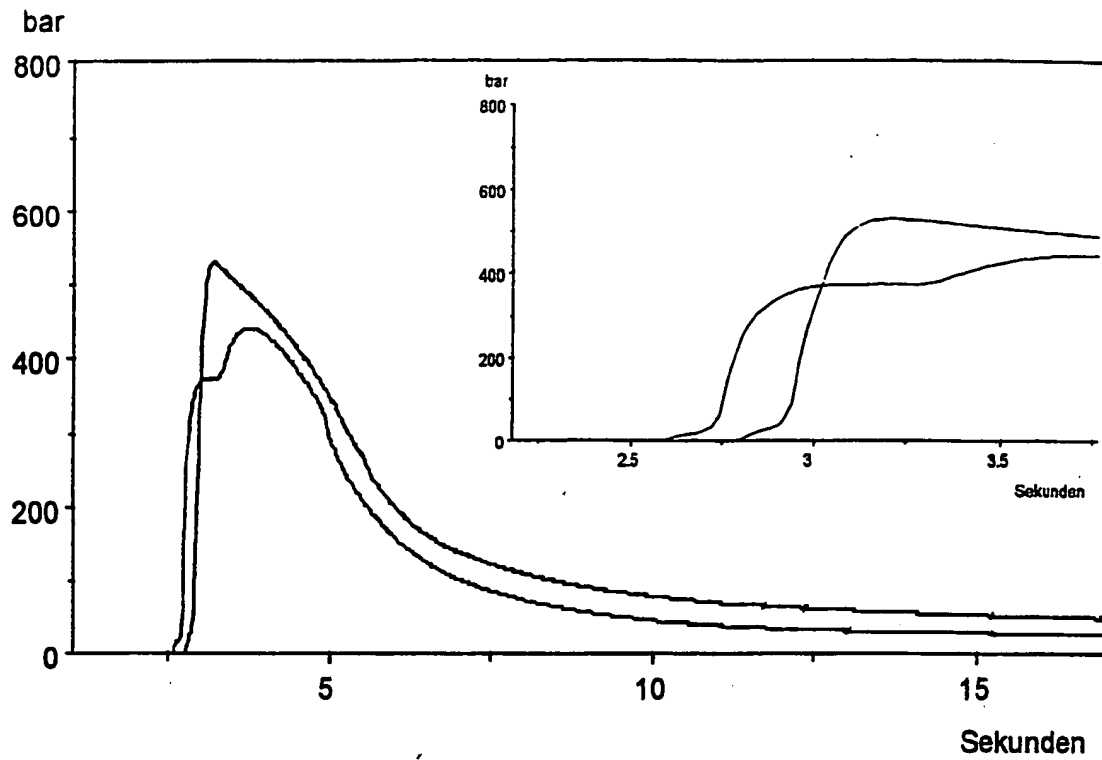


Fig. 4

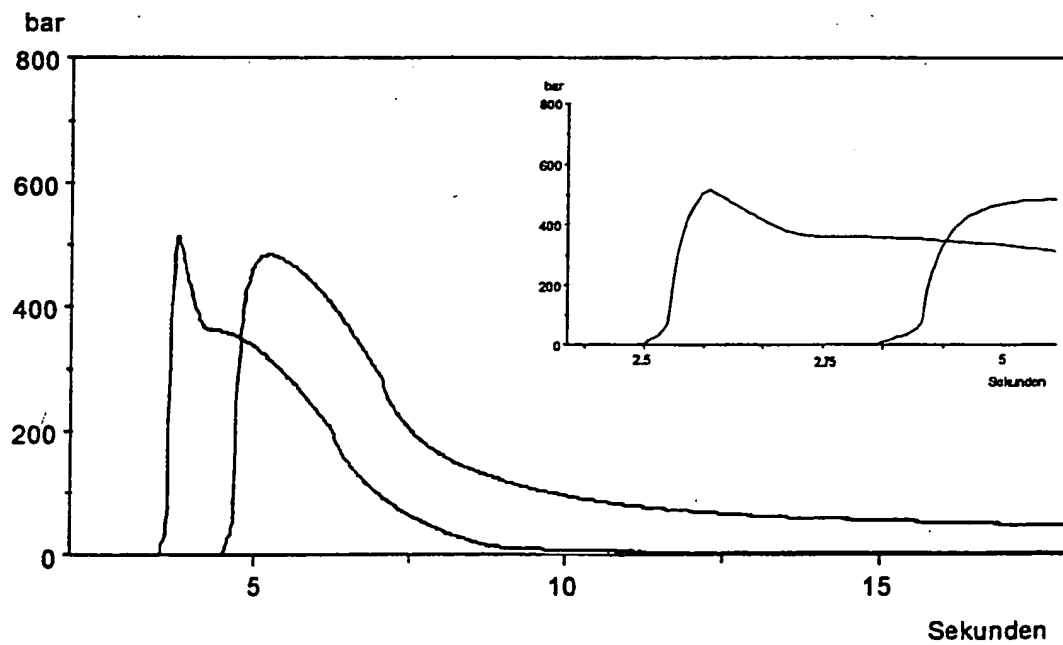


Fig. 5

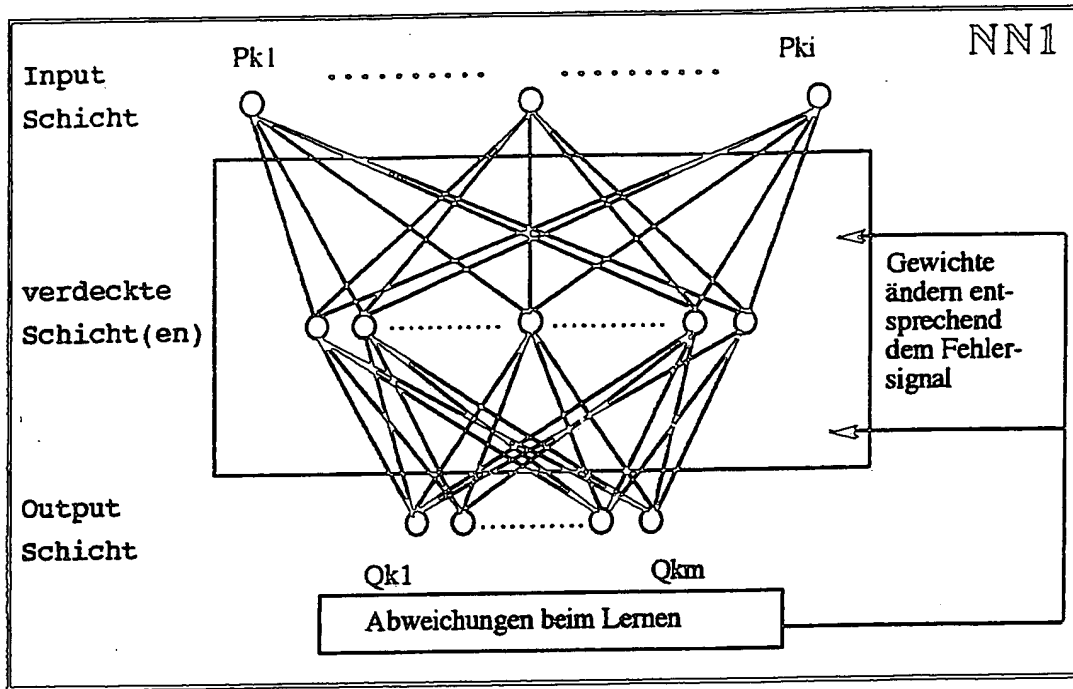


Fig. 6

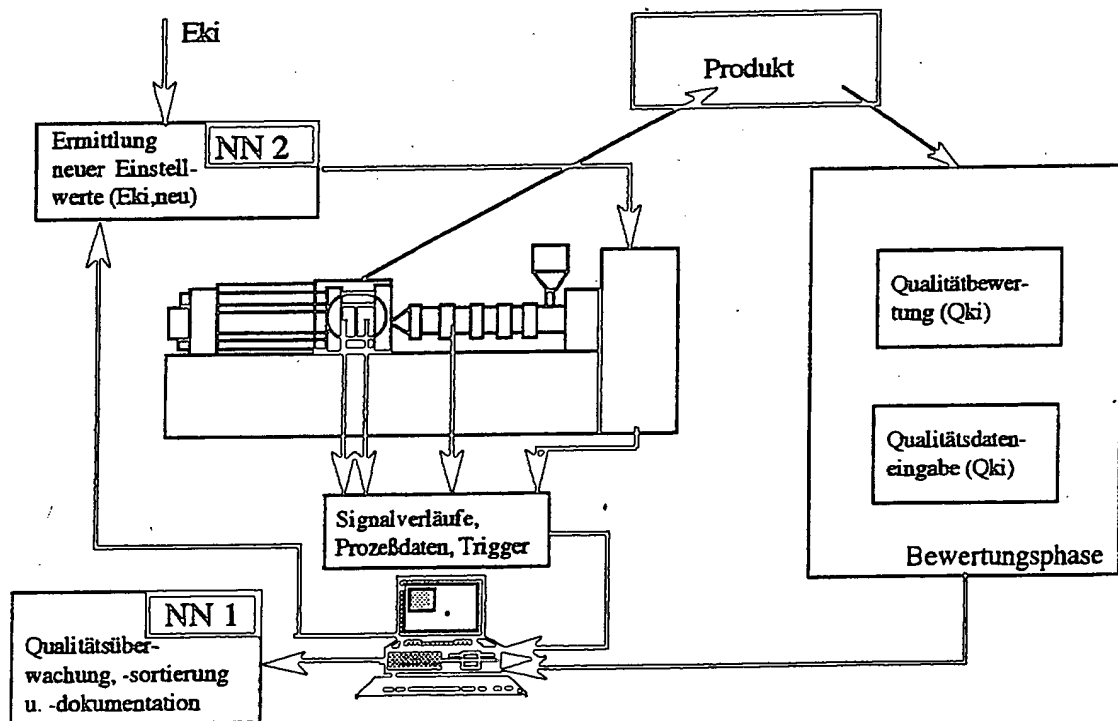


Fig. 7

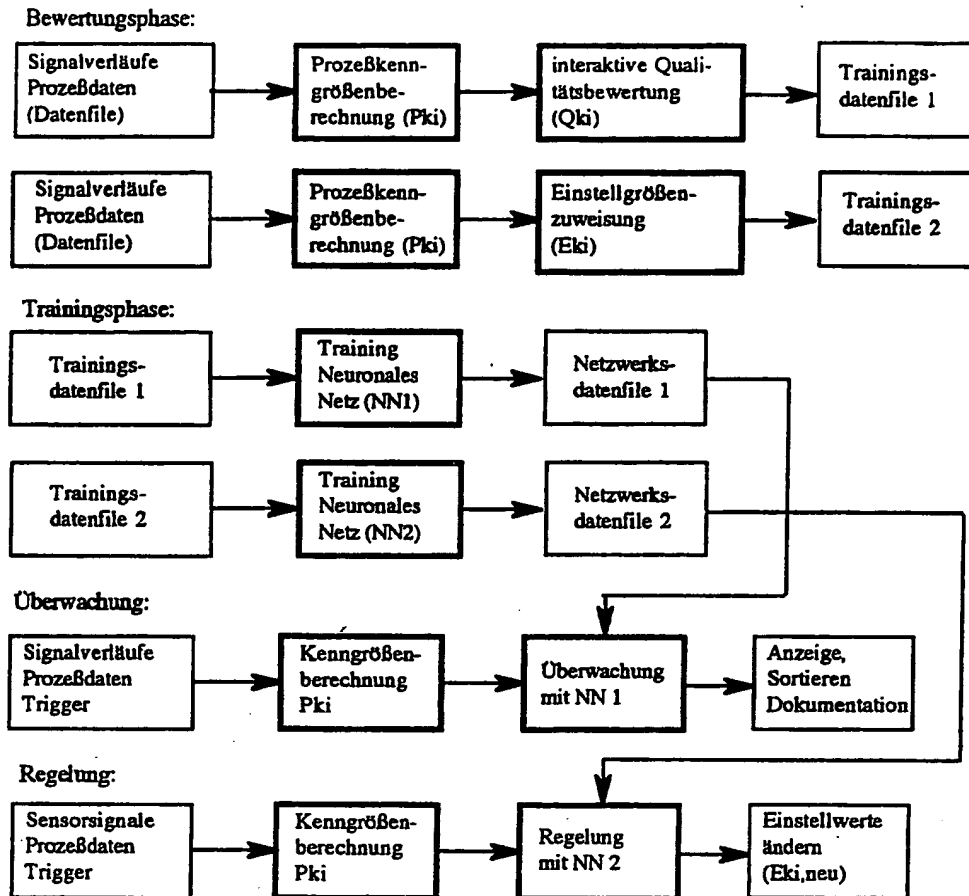


Fig. 8

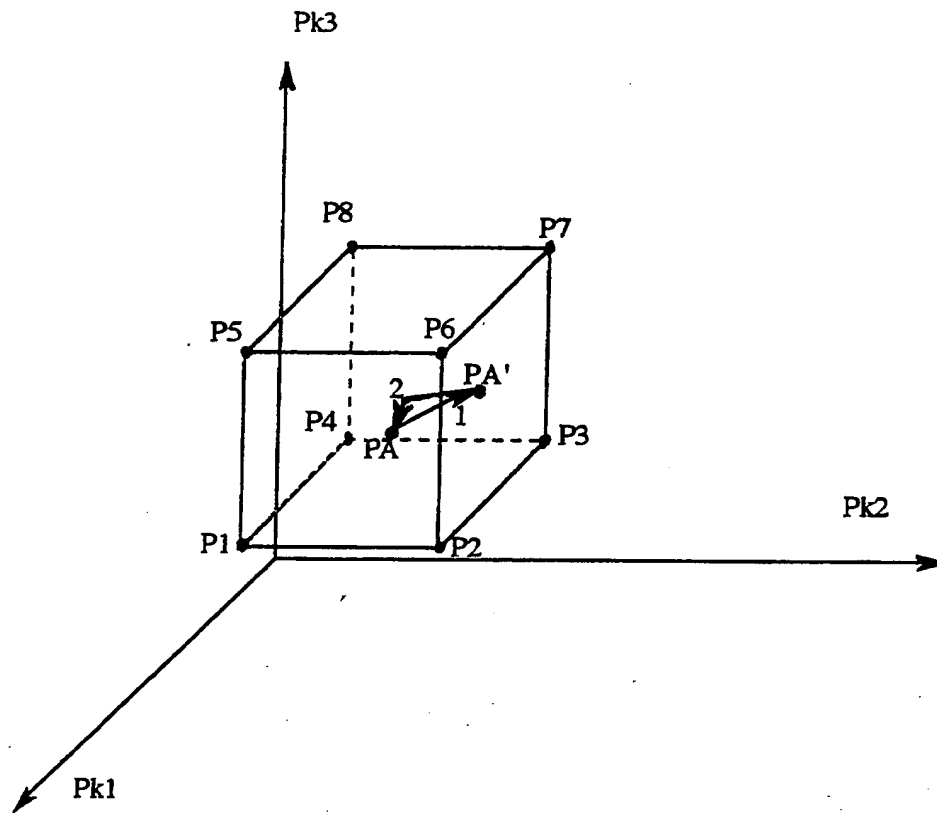


Fig. 9

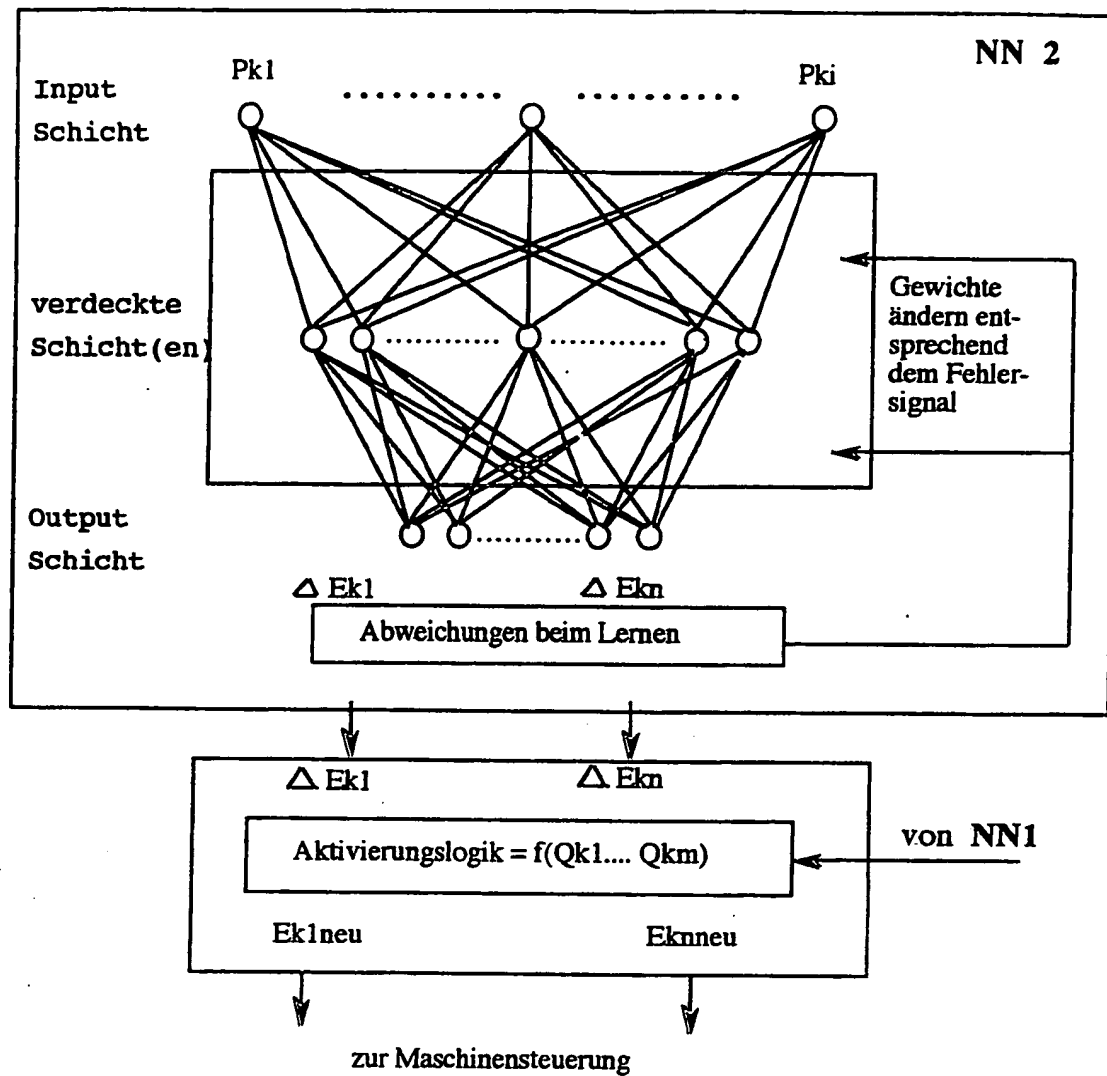
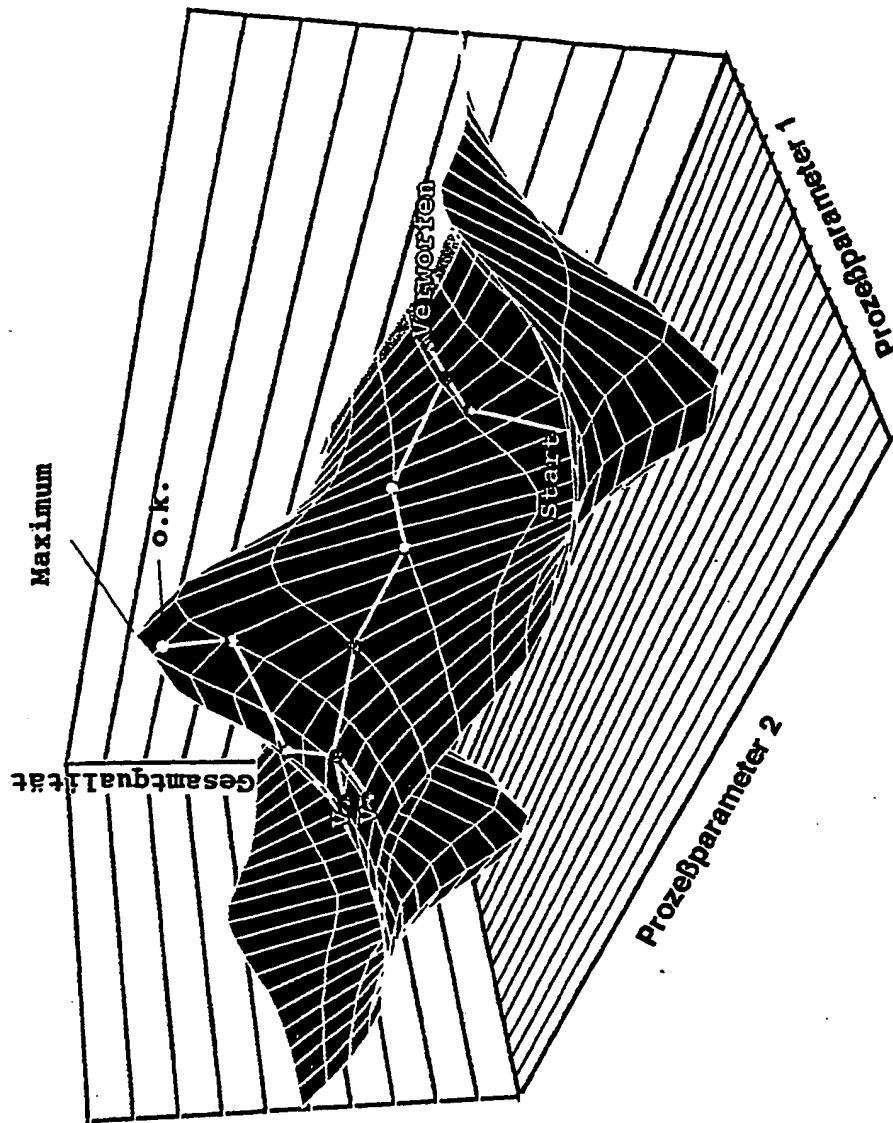


Fig. 10



Figur 11

DOCKET NO: E-41482

SERIAL NO: 10/030,238

APPLICANT: Burkhardt et al.

LERNER AND GREENBERG P.A.

P.O. BOX 2480

HOLLYWOOD, FLORIDA 33022

TEL. (954) 925-1100